

Л.В. КОНОНЕНКО, М.Г. БОНДАРЕНКО, В.И. МАНИЧЕВ, В.И. ВЛАСЕНКО

Институт геохимии окружающей среды НАН Украины и МЧС Украины, г. Киев

ЕСТЕСТВЕННЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ПОЧВАХ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ТРИПОЛЬСКОЙ ТЭС

Концентрации естественных радионуклидов (ЕРН) определены в почвах зоны влияния Трипольской ТЭС и в образцах золы ТЭС. Незначительное обогащение почв изотопами радия и ^{40}K отмечено в отдельных пунктах зоны Трипольской ТЭС.

Введение

Исследования влияния угольных ТЭС на окружающую среду преимущественно ориентированы на наиболее массовые и очевидные загрязнители: SO_2 , оксиды азота, CO , твердые частицы, полициклические ароматические углеводороды. Эти загрязнители, являющиеся компонентами дымовых газов, выбрасываемых ТЭС, оказывают негативное воздействие, прежде всего, на дыхательные пути человека в зоне влияния ТЭС. Оксиды серы и азота, взаимодействуя с влагой, образуют кислоты, выпадающие на поверхность почвы в виде так называемых кислотных дождей.

Кроме того, известно, что угли содержат более 50 элементов-примесей, которые также поступают в атмосферу в составе дымовых уносов. К их числу относятся также естественные радионуклиды (ЕРН) – так, в каменном угле содержится от 50 до 90 Бк/кг урана.

При сгорании органического топлива с дымовыми выбросами в атмосферу поступают радиоактивные ^{40}K , ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th и продукты их распада. По расчетам при зольности угля 10% за год ТЭС мощностью 1 ГВт с коэффициентом очистки выбросов 0,975 выбрасывают в атмосферу, ГБк: ^{40}K – 4,0, ^{238}U и ^{226}Ra – по 1,5, ^{210}Pb и ^{210}Po – по 5,0, ^{232}Th – 1,5. В действительности зольность используемого в качестве топлива угля колеблется от 10 до 45 %, поэтому объемы выбросов естественных радионуклидов в окружающую среду могут иметь и более высокие значения (табл. 1). Суточный выброс золы в атмосферу составляет 36 т, и при высоте трубы 150–200 м радиус загрязненной территории равен примерно 50 км [1, 2]. Поступление ЕРН в окружающую среду может осуществляться как в виде выброса с дымовыми газами ТЭС, так и в результате пылеуноса с золоотвалов.

Таблица 1. Выбросы естественных радионуклидов, их содержание в атмосфере и накопление в почве в районе расположения угольной ТЭЦ мощностью 1 ГВт [3].

Параметр	Радионуклид					
	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{228}Ra	^{40}K
Годовой выброс, ГБк	19.6	81.4	74.0	19.6	11.1	39.8
Накопление в почве, ГБк/м ³	388	1147	703	389	92.5	98.3
Плотность загрязнения территории, ГБк/км ²	0.39	1.15	0.70	0.51	0.09	0.38
Концентрация в воздухе, 10^{-5} Бк/м ³	6.3	15.0	15.4	6.3	4.1	3.9

По оценкам, приведенным в «Радиоэкологии» М.Г.Давыдова [2], тепловая электростанция мощностью 1 ГВт, сжигая 12 млн т угля, выбрасывает в атмосферу 40 Ки долгоживущих радионуклидов и создает мощность дозы в районе станции 45–80 мкР/час.

По другим оценкам [4], сжигание 1 млн т донбасского угля приводит к выбросу в окружающую среду до 10.0 Ки ^{226}Ra , 3.3 Ки ^{232}Th и до 50.0 Ки ^{40}K .

Средняя концентрация естественных радионуклидов в летучей золе тепловых электростанций приведена в таблице 2.

Таблица 2. Средняя концентрация ЕРН в летучей золе тепловых электростанций, Бк/кг [5].

Радионуклид	^{40}K	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{228}Th	^{228}Ra
Активность, Бк/кг	500	200	200	600	600	200	200	200

По данным Мельника Н.А. и Корнилова П.Н. [6] зола-унос Апатитской ТЭЦ, улавливаемая очистными установками, содержит 40–95 Бк/кг ^{232}Th , 50–175 Бк/кг ^{226}Ra и от 425 до 1080 Бк/кг ^{40}K . Зола из золоотвалов той же ТЭЦ характеризуется несколько более низкими содержаниями ^{232}Th (30–80 Бк/кг) и ^{226}Ra (10–145 Бк/кг), активность ^{40}K в этой золе, напротив, выше (450–2200 Бк/кг) по сравнению с золой-уносом.

Выбрасываемые в атмосферу частицы золы-уноса, содержащие естественные радионуклиды, оседают на поверхность почвы и накапливаются в почвенном покрове. В почвах, в свою очередь, содержится аналогичный набор естественных радионуклидов, унаследованный от материнских горных пород.

Естественные радионуклиды в почвах

^{40}K является одним из главных ЕРН в почвах, водах, донных отложениях и в биологических объектах. В почве калий содержится преимущественно в виде оксидов в неорганической фракции и в почвенном растворе в виде солей. В биомассу на земной поверхности он поступает преимущественно в растворимой форме через корневую систему растений и распределяется в живых организмах равномерно.

Кроме того, в почвах представлены ЕРН уранового и ториевого семейств.

^{238}U (**99,28%**), $T_{1/2} = 4,51 \cdot 10^9$ лет. Среди продуктов распада ^{238}U такие радионуклиды, как ^{230}Th , $T_{1/2} = 8 \cdot 10^4$ лет; ^{226}Ra , $T_{1/2} = 1602$ года; ^{222}Rn , $T_{1/2} = 3,825$ дн.; ^{210}Bi , $T_{1/2} = 5,01$ сут; ^{210}Po , $T_{1/2} = 138,4$ сут и ^{210}Pb , $T_{1/2} = 21$ год.

Одним из основных источников естественного радиационного фона является ^{226}Ra – долгоживущий продукт распада ^{238}U ($T_{1/2} = 1602$ года), по химическим свойствам подобный бариию. В почвах кислого ряда, характерных для гумидной климатической зоны, концентрация ^{226}Ra , как правило, превышает равновесную концентрацию с ^{238}U [7]. Содержание радия в таких почвах коррелирует с содержанием глинистых минералов, гидроксидов Fe, Al, Mn, органического вещества, что указывает на сорбционный характер связи его с почвенным комплексом. В черноземах и почвах аридной зоны радий накапливается на карбонатных и сульфатных испарительных барьерах, соосаждаясь с карбонатами и сульфатами других щелочно-земельных металлов. Радий содержится практически во всех объектах окружающей среды, хорошо усваивается растениями и через них может поступать в организмы животных.

Продуктом распада ^{226}Ra является газообразный ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,825$ дн.). Радон – радиоактивный благородный газ, характеризующийся химической инертностью. В природе он имеет три изотопа – помимо ^{222}Rn , представляющего ряд ^{238}U , известны также короткоживущие ^{220}Rn (торон, $T_{1/2} = 54,5$ с) и ^{219}Rn (актинон, $T_{1/2} = 3,9$ с), представляющие, соответственно, ряды распада ^{232}Th и ^{235}U .

Коэффициент растворимости радона в воде составляет 0,25–0,30 при 15 °С. Содержание радона в природных водах в целом снижается от подземных и грунтовых вод к поверхностным. Растворимость радона в органических растворителях значительно выше. Вследствие хорошей растворимости радона в жирах, он способен накапливаться в жировой ткани человека, что является одним из факторов радиационной опасности [7].

Радон сорбируется на поверхности твердых тел. Адсорбированный радон очень подвижен и легко перераспределяется в твердом теле от крайних молекулярных слоев в

более глубокие зоны. Основной путь поступления радона в организм – ингаляционный (при дыхании), а основное радиационное воздействие связано с дочерними продуктами распада радона.

Среди продуктов распада ^{222}Rn – короткоживущие гамма-излучающие изотопы ^{214}Pb ($T_{1/2} = 27$ мин) и ^{214}Bi ($T_{1/2} = 19,7$ мин) и относительно долгоживущий бета-излучающий ^{210}Pb ($T_{1/2} = 22$ года).

Родоначальник ториевого ряда – ^{232}Th ($T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$ лет). Среди продуктов его распада – радионуклиды ^{228}Ra ($T_{1/2} = 5,8$ лет), ^{228}Th ($T_{1/2} = 1,9$ года); гамма-излучающий ^{228}Ac ($T_{1/2} = 6,1$ часа) и ^{224}Ra ($T_{1/2} = 3,6$ сут). Продуктом распада ^{224}Ra является короткоживущий изотоп радона ^{220}Rn (торон, $T_{1/2} = 54,5$ с). Вследствие распада торона последовательно образуются несколько короткоживущих изотопов, среди которых наиболее долгоживущий гамма-излучатель ^{212}Pb ($T_{1/2} = 10,64$ час) и ^{212}Bi ($T_{1/2} = 1$ час).

В процессе почвообразования ЕРН привносились от разрушавшихся материнских (подстилающих) пород в виде дисперсного материала, накапливались в тонких фракциях почвы в результате поглощения (сорбции) их глинистым и коллоидным веществом. Поэтому содержание ЕРН в почвах определяется их содержанием в материнских породах, процессами выщелачивания их из этих пород подземными водами. Среди факторов, определяющих содержание ЕРН в почвах, – рН почвенного раствора, особенности осаждения и адсорбции ЕРН, их комплексообразования с органической (гумусной) составляющей почв, а также воздействие микроорганизмов.

ЕРН в процессе почвообразования и позднее участвуют в общем круговороте – часть их с газами через почву эманурует в атмосферу, часть концентрируется в наземных растениях, часть с грунтовыми водами и осадками выносится в гидросферу.

Все члены радиоактивных рядов связаны друг с другом последовательными необратимыми взаимными превращениями. Если система, в которой находятся радионуклиды того или иного ряда, закрыта, т.е. не происходит поступления или выноса отдельных членов ряда, со временем устанавливается радиоактивное равновесие. При этом в ряду распада между числом атомов каждого члена и скоростью его распада устанавливается следующее соотношение:

$$N_1 \cdot \lambda_1 = N_2 \cdot \lambda_2 = \dots N_i \cdot \lambda_i, \quad (1)$$

где: N – число атомов изотопа, λ – постоянная его радиоактивного распада.

Нарушение радиоактивного равновесия возникает в результате перемещения одних членов ряда относительно других из системы, либо внутрь нее. Обычно нарушения радиоактивного равновесия наблюдаются на границе раздела двух фаз.

Выше было упомянуто о нарушении радиоактивного равновесия в почвах между ^{226}Ra и материнским изотопом ^{238}U вследствие геохимических процессов, происходящих как в период почвообразования, так и при функционировании почвы. Кроме того, членами как уранового, так и ториевого рядов являются изотопы газообразного радона (^{222}Rn и ^{220}Rn , соответственно), которые могут из почвы поступать в атмосферу (рис. 1). Продукты распада радона приобретают электрический заряд и, соответственно, способность присоединяться в воздухе к аэрозольным частицам и с ними перемещаться (в том числе и в процессе диффузии) и осаждаться. Это приводит к нарушению равновесия между радоном и продуктами его распада.

Газообразный радон перемещается в атмосферном воздухе на большие расстояния, а продукты его распада практически полностью и довольно быстро выпадают на земную поверхность с пылевыми частицами, аэрозолями и атмосферными осадками. Продолжительность пребывания их в воздухе зависит от устойчивости и времени пребывания в воздухе этих носителей и составляет около $20 \div 40$ суток.

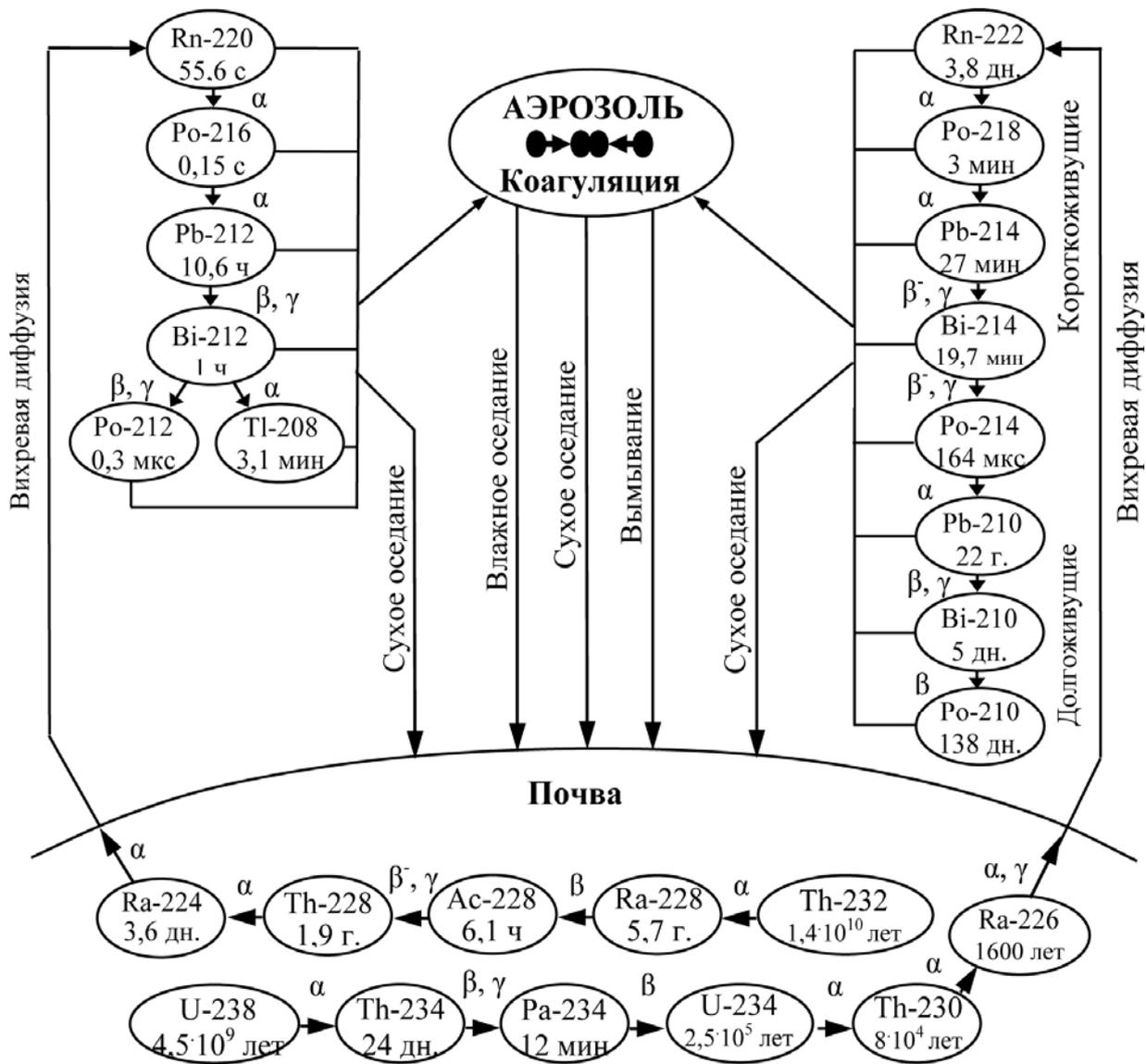


Рис. 1. Схема распределения изотопов радона и их дочерних продуктов между почвой и атмосферой [8]

Таким образом, почва, в общем, является природным образованием, для которого характерно нарушение радиоактивного равновесия ЕРН, особенно в ряду ^{238}U . Отмечается [2], что в ряду ^{232}Th в большинстве случаев в природных условиях имеет место радиоактивное равновесие, что, очевидно, можно объяснить коротким временем жизни продуктов распада (в особенности это важно для газообразного ^{220}Rn) по сравнению с материнским изотопом.

Объект исследования

Трипольская ТЭС, имеющая мощность 1800 МВт, расположена на правом берегу р. Днепр у г. Украинка, на нижней террасе с отметкой уровня 5–6 м и является достаточно обособленным крупным стационарным источником загрязнения атмосферы. В 30 км на север конкуренцию ей составляет г. Киев, в остальных направлениях расстояние до крупных источников загрязнения атмосферы значительно больше.

В геологическом строении исследуемого района на общем фоне спокойного погружения пород осадочного комплекса выделяется толща мергелей харьковской свиты, формирующих систему антиклинальных складок. Вся территория входит в зону

распространения лёсса, средняя мощность которого составляет 3–4 м, а максимальная на береговых склонах – до 10 м.

Зона влияния Трипольской ТЭС относится, в основном, к лесостепи, годовое количество осадков составляет 500–650 мм. Основное направление ветра – западное, северо-западное, северное. Наиболее распространены ландшафты с развитым лессовым плато и с достаточно мощными малогумусными черноземами. На общем равнинном фоне наблюдаются микрозападины, а ближе к р. Днепр развит овражно-балочный рельеф.

На правом берегу р. Днепр отмечается заметное разнообразие типов почв, среди которых наибольшее развитие имеют черноземы, мощность гумусированных горизонтов которых достигает 100 см, окраска светло-серая, структура слабовыраженная комковато-зернистая. Содержание гумуса в почве не превышает 6,5 %.

Оподзоленные почвы имеют меньшее развитие. Мощность почвенного разреза не превышает 80 см, окраска тёмно-серая, содержание гумуса в почве колеблется от 2,5 до 3,8%.

Под лесами смешанного типа развиты темно-серые лесные почвы. Их мощность не превышает 55 см. Верхний почвенный горизонт рыхлый, с темно-серой окраской, структура зернисто-пылеватая, ниже по вертикальному разрезу – ореховатая, буровато-серой окраски.

На территории, соответствующей нижней террасе р. Днепр развиты песчаные отложения, а также дерново-подзолистые почвы, мощность которых колеблется от 30 до 50 см. Окраска этих почв серая и светло-бурая, по составу почвы супесчаные. Дерново-подзолистые почвы характерны как для открытых, так и залесенных участков. На этих почвах отмечается густое разнотравье.

В устьях небольших рек (р.р. Красная, Бобрица, Сквиря), впадающих в р. Днепр восточнее электростанции, расположены небольшие пойменные участки с луговыми почвами.

Более однородный почвенный спектр имеет место на левом берегу р. Днепр (р-н с. Кийлов, в 9 км от ТЭС). Здесь в прибрежной части наблюдаются аллювиальные песчаные отложения. За дамбой, под хвойным лесом развиты дерново-подзолистые почвы, мощность которых не превышает 25 см. Дерновый слой представлен хвойным опадом.

Отбор почв был проведен на отдельных участках, расположенных на различном удалении от Трипольской ТЭС с учетом особенностей рельефа, ландшафтных признаков, преобладающего направления ветра (рис. 2). Образцы почв были отобраны, главным образом, на правом берегу Днепра, несколько образцов дерново-подзолистых почв отобраны на левобережье – в районе с. Кийлов, расположенного на расстоянии 9 км от Трипольской ТЭС по прямой линии. Для получения реперных (фоновых) содержаний тяжелых металлов были отобраны и изучены образцы черноземных почв с относительно экологически чистых территорий, расположенных на удалении от ТЭС на юг и юго-запад свыше 50 км (окрестности г. Мироновки и р-н с. Пологи Белоцерковского р-на). Почвы отбирались в соответствии с принятой методикой по квадратам со стороной 1 м.

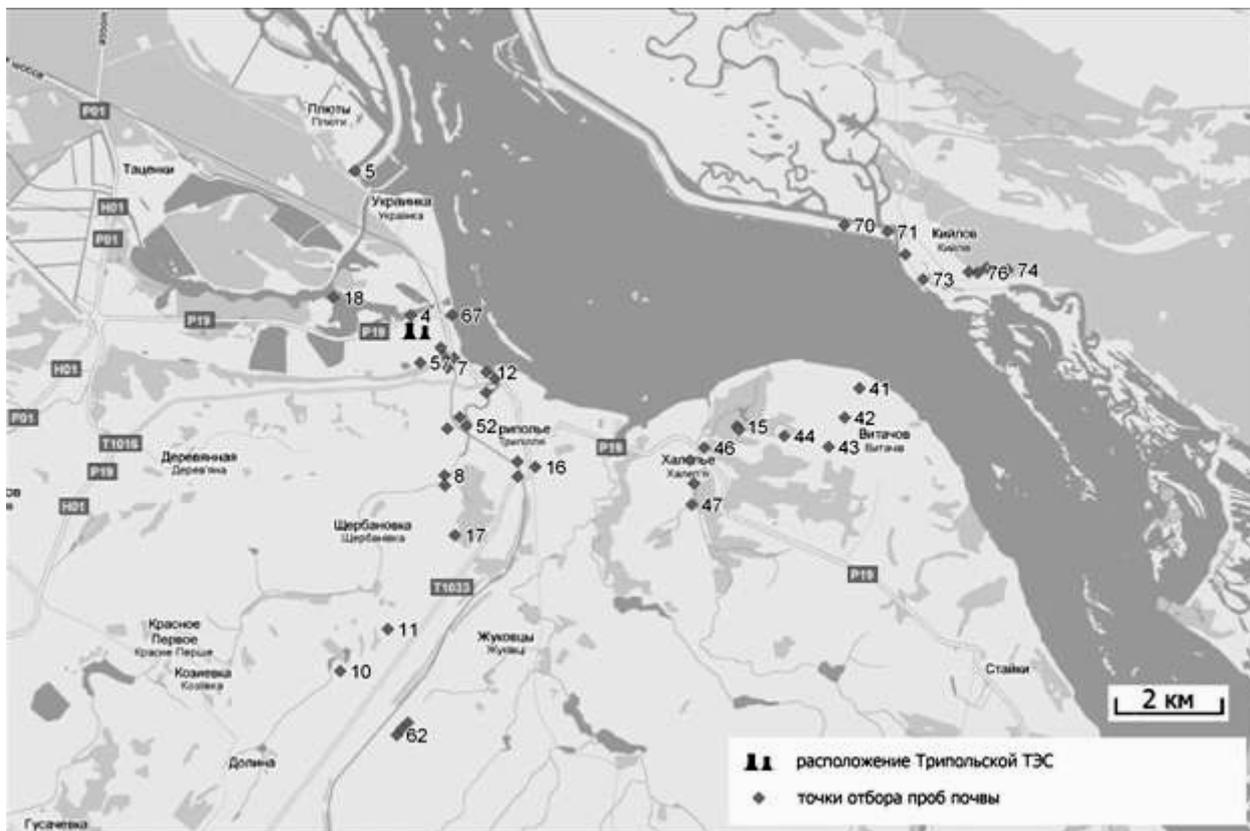


Рис. 2. Карта отбора проб почв в зоне влияния Трипольской ТЭС

Результаты исследований и их обсуждение

Отобранные образцы почв были проанализированы нами на содержание естественных радионуклидов гамма-спектрометрическим методом с помощью анализатора АИ-1024-95 с полупроводниковым Ge(Li)-детектором. Измерения проводились в геометрии Маринелли. Результаты определения гамма-активности радионуклидов представлены в таблице 3, где образцы почв сгруппированы в зависимости от расстояния их местоположения от ТЭС. Гамма-спектрометрическому анализу были подвергнуты также образцы угля, золы и шлака (табл.4).

Таблица 3. Активность естественных радионуклидов в почвах зоны влияния Трипольской ТЭС, Бк/кг

Образец	Тип почвы	Ряд ^{238}U				Ряд ^{232}Th		Ряд ^{235}U	^{40}K	$^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$
		^{234}Th	^{226}Ra	^{214}Pb	^{214}Bi	^{228}Ac	^{212}Pb	^{223}Ra		
До 1 км										
Т-4	ДП	85.0	29.3	39.7	25.6		33.8		303	0,34
Т-7	ДП	56.6	32.9	69.3	96.6	34.5	24.1	166	449	0,58
Т-55	П	20.0	97.5	32.4	39.9		1.23		112	4,87
Т-56	Ч			64.6	67.7	39.3	13.6		199	-
Т-65	Ч		218	128	146	75.7	50.6		673	-
Т-66	Ч	103	50.3	61.1	112	43.9	36.1	245	552	0,49
Т-67	П	38.9		26.6	45.7	35.4	10.2		166	-
От 1 до 2 км										
Т - 12	ДП	53.9	121	74.8	143	48.8	40.3	100	553	2,25
Т - 14	ДП		95.4	74.0	98.8	32.7	35.4	124	607	-
Т - 18	Ч	113	104	47.2			6.38		155	0,92
Т-53	Ч	46.5	62.8	96.9	113	55.3	29.9	131	543	1,35

T-54	ДП		26.4	49.8	69.1	29.6	21.3	148	378	-
T-64	Ч		27.6		36.4	19.4	17.2		270	-
От 2 до 4 км										
T-5	ДП	51.1	26.0	56.2	25.6	24.2	11.2		159	0,51
T-8	Ч	48.2	34.2	101	169	24.9	40.8	131	590	0,71
T - 9	СГ	43.3	70.8	83.2	97.7	64.4	44.3	149	716	1,63
T - 16	ДП		59.9	94.6	80.3	46.9	31.2	153	638	-
T - 17	ДП	160	154	123	126	54.8		180	610	0,96
T-50	ДП	38.7	46.6	68.4	49.8	24.0	31.8	93.8	354	1,20
T-51	Ч	66.2		89.0	127	72.9	41.9	154	543	-
T-52	П	293			24.5		12.3		75.9	-
От 5 до 7 км										
T - 10	ДП	29.6	39.6	74.3	105	31.7	29.7		489	1,34
T - 11	Ч	91.6	75.3	100	100	43.2	49.5		682	0,82
T - 15	ДП		92.1	95.4	110	43.8	44.1	82.4	537	-
T-45	ДП	52.8	157	77.3	83.2	58.4	46.8	135	517	2,98
T-46	Ч	102	111	103	128	26.1	41.4	149	507	1,09
T-47	ДП	72.1	39.4	32.3	115	25.5	10.4	70.7	373	0,55
T-48	Ч	41.4	31.9	81.0	125	42.6	32.0	13.1	444	0,77
T-49	Ч			59.3	65.0	54.9	24.6	129	398	-
От 7 до 9 км										
T-41	Ч		80.2	71.8	101	40.1	30.6		587	-
T-42	Ч	39.5		99.3	124	58.1	39.7	201	653	-
T-43	Ч	28.7	128	106	110	57.8	37.9	296	533	4,46
T-44	ДП	250	67.3	109	148	51.6	44.7	207	614	0,27
T-61	Ч	110		118	86.4	70.1	40.1		789	-
T-62	Ч	44.4	101	108	84.2	32.0	50.5	163	758	2,27
T-63	Ч	83.0	132	95.9	134	51.2	54.4	170	636	1,59
От 9 до 11 км										
T-70	ДП		82.4	33.2		36.9	12.4	153	229	-
T-71	ДП	37.4		42.0	22.5	26.2	13.6	108		-
T-72	ДП	267	31.3	26.5					135	0,117
T-73	ДП			13.9			1.31		107	-
T-74	ДП	118		25.4	9.84		5.95	26.7	75.1	-
T-75	ДП	20.9		38.1	17.3		13.8		177	-
T-76	ДП	47.3	26.5	20.6	21.4	46.2	7.76	106	328	0,56
T-77	ДП			26.1	12.5				204	-
56-57 км										
T-57	Ч	58.2	119	45.1	129	24.1	23.0	136	541	2,04
T-58	Ч	66.3	103	76.2	51.5	43.9	39.8	96.1	437	1,55
T-59	Ч		118	72.4	89.7	27.1	35.7		549	-
T-60	Ч		54.4	37.6	41.6	58.3	40.1	106	470	-

ДП - дерново- подзолистая, Ч – чернозем, СГ – суглинистая, П – песчаная почва.

Таблица 4. Активность естественных радионуклидов в углях и золе Трипольской ТЭС, Бк/кг.

Образец		Ряд ^{238}U				Ряд ^{232}Th		Ряд ^{235}U	^{40}K	$^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$
		^{234}Th	^{226}Ra	^{214}Pb	^{214}Bi	^{228}Ac	^{212}Pb	^{223}Ra		
ТС-28	уголь	53.6	83,1	114	115	34.8	23.5		243	1,55
ТС-29	уголь		93,6	140	148	91.1	27.1	129	361	-

Ш-1	зола	41.8	246	163	261	59.8	59.0	137	872	5,88
Ш-2	зола	55.1	220	202	169	60.7	52.3	161	818	4,0
Ш-3	зола	43.2		208	251	54	96.6	466	1180	6,80
Шлк-4	шлак	141	171	166	169	40.3	54.0	305	460	1,21

По данным гамма-спектрометрического анализа в исследованных почвах обнаружены радионуклиды ряда $^{238}\text{U} - ^{234}\text{Th}, ^{226}\text{Ra}, ^{214}\text{Pb}, ^{214}\text{Bi}$, ряда $^{232}\text{Th} - ^{228}\text{Ac}, ^{212}\text{Pb}, ^{212}\text{Bi}$, и ряда $^{235}\text{U} - ^{223}\text{Ra}$. Во всех пробах также присутствует радионуклид ^{40}K , который накапливается в золе от сгорания угля, а также является наиболее распространенным среди естественных радионуклидов почвы. Повсеместно обнаруживается также ^{137}Cs , загрязнивший почвы в результате Чернобыльской катастрофы (рис. 3).

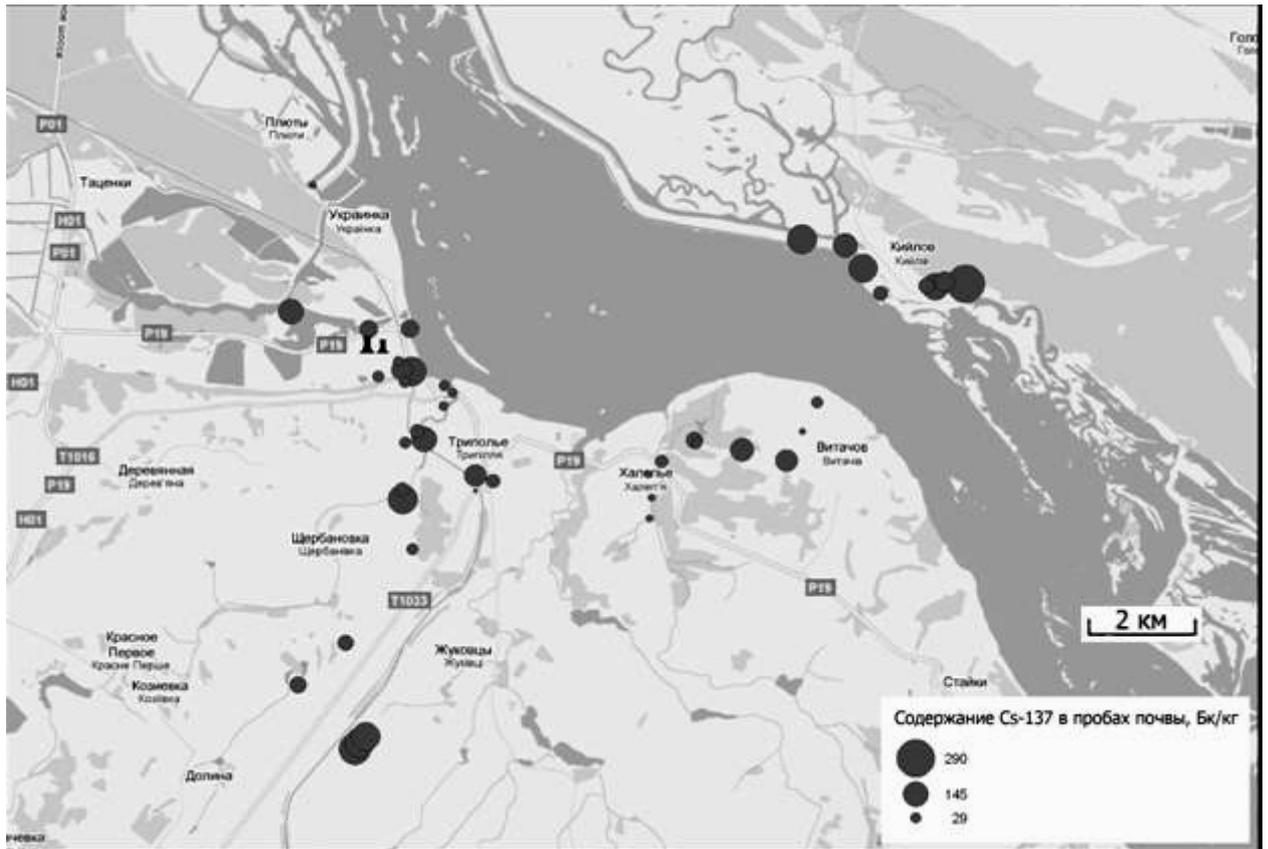


Рис. 3. Карта загрязнения ^{137}Cs почв в районе Трипольской ТЭС

Изотоп ториевого ряда ^{228}Ac ($T_{1/2} = 6,1$ ч) является короткоживущим продуктом распада более долгоживущего ^{228}Ra ($T_{1/2} = 5,7$ года). Для систем, состоящих из двух последовательно распадающихся изотопов, из которых материнский изотоп гораздо более долгоживущий, чем дочерний, т.е. $T_1 \gg T_2$, соотношение атомов дочернего и материнского изотопов определяется как:

$$N_2 = N_1 \frac{T_2}{T_1 - T_2} \left(e^{-\frac{0,693}{T_1}t} - e^{-\frac{0,693}{T_2}t} \right) \quad (2)$$

где: N_1 и N_2 – число атомов материнского и дочернего изотопов, соответственно; T_1 и T_2 – периоды полураспада материнского и дочернего изотопов, соответственно. По истечении некоторого времени устанавливается вековое равновесие между количествами материнского и дочернего изотопов:

$$\frac{N_1}{T_1} = \frac{N_2}{T_2} \quad (3)$$

что представляет собой математическое выражение, тождественное уравнению (1).

При вековом равновесии активности дочерних изотопов равны активности материнского изотопа, хотя количество их нуклидов отличается пропорционально периодам полураспада. То есть, в паре изотопов ^{228}Ra - ^{228}Ac по активности гамма-излучателя ^{228}Ac можно судить об активности бета-излучающего ^{228}Ra . В соответствии с уравнением (2) равновесие между этими двумя изотопами устанавливается на 99% через 48 часов, на 90% – через 20 часов.

Короткоживущие изотопы ^{214}Pb и ^{214}Bi являются, по существу, индикаторами их материнского изотопа радона ^{222}Rn , образующегося, в свою очередь, вследствие распада ^{226}Ra .

Сравнение концентраций ЕРН в почвах, в золе и в угле показывает, что зола ТЭС существенно обогащена изотопом ^{226}Ra , а также ^{40}K . Обогащенность золы ^{228}Ra гораздо менее выражена. В то же время, в золе можно отметить обеднение изотопом ^{234}Th , он накапливается предпочтительно в шлаке (табл. 4). То есть, в золе ТЭС существенно нарушено равновесие между изотопами уранового ряда ^{226}Ra и ^{234}Th .

Очевидно, можно сделать вывод, что обогащение почв такими радионуклидами, как ^{226}Ra , ^{228}Ra может быть следствием накопления этих радионуклидов, выпавших в составе золы-уноса из труб ТЭС. В качестве индикатора техногенного накопления радионуклидов в почве, по нашему мнению, можно принять также отношение радионуклидов $^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$, которое в почвах колеблется от 0,12 до 4,8 (табл. 3). Для золы это отношение гораздо выше – от 4 до 6,8 (табл. 4).

Как известно, осаждение аэрозольных загрязнителей из атмосферы на подстилающую поверхность происходит двумя основными путями – в результате сухого и мокрого осаждения.

Сухое осаждение, в случае газов и частиц диаметром менее 10 мкм, происходит вследствие турбулентной диффузии и Броуновского движения, для более крупных частиц преобладающим фактором является гравитация. Поскольку сухое осаждение происходит из приземного слоя атмосферы, в случае высокого источника выбросов и ветра, даже несильного, оно начинается на значительном расстоянии от источника.

Влажное осаждение можно разделить на два механизма - вымывание из облаков, и захват каплями дождя или снегом ниже облаков. Таким образом, влажное осаждение вовлекает частицы загрязнителя на любой высоте, и начинается непосредственно от источника выбросов. Также отметим, что интенсивность влажного осаждения значительно выше, чем сухого.

Все эти процессы сопровождаются радиоактивным распадом исходных радионуклидов и накоплением дочерних продуктов распада.

Поскольку величина загрязнения почвы, возникающего в результате многолетнего протекания описанных процессов, с увеличением расстояния от источника уменьшается постепенно, сложно выделить какой-либо «радиус загрязнения». Вероятно, более корректной будет формулировка «около 10% аэрозольных выбросов твердых частиц оседают в радиусе 50 км от источника».

За счет влажного осаждения аэрозолей ТЭС можно было бы ожидать накопления ЕРН в непосредственной близости от источника загрязнения. Однако, карты распределения ^{226}Ra и ^{228}Ra в почвах зоны влияния Трипольской ТЭС, приведенные на рис. 4 и 5, демонстрируют отсутствие явной закономерности распределения этих радионуклидов в зависимости от расстояния от ТЭС.

Интервалы концентраций ЕРН и их средние значения сгруппированы в таблице 5 для дерново-подзолистых и черноземных почв в зависимости от удаленности точек отбора от источника загрязнения. Для сравнения приведены также интервалы концентраций радионуклидов в золе ТЭС.

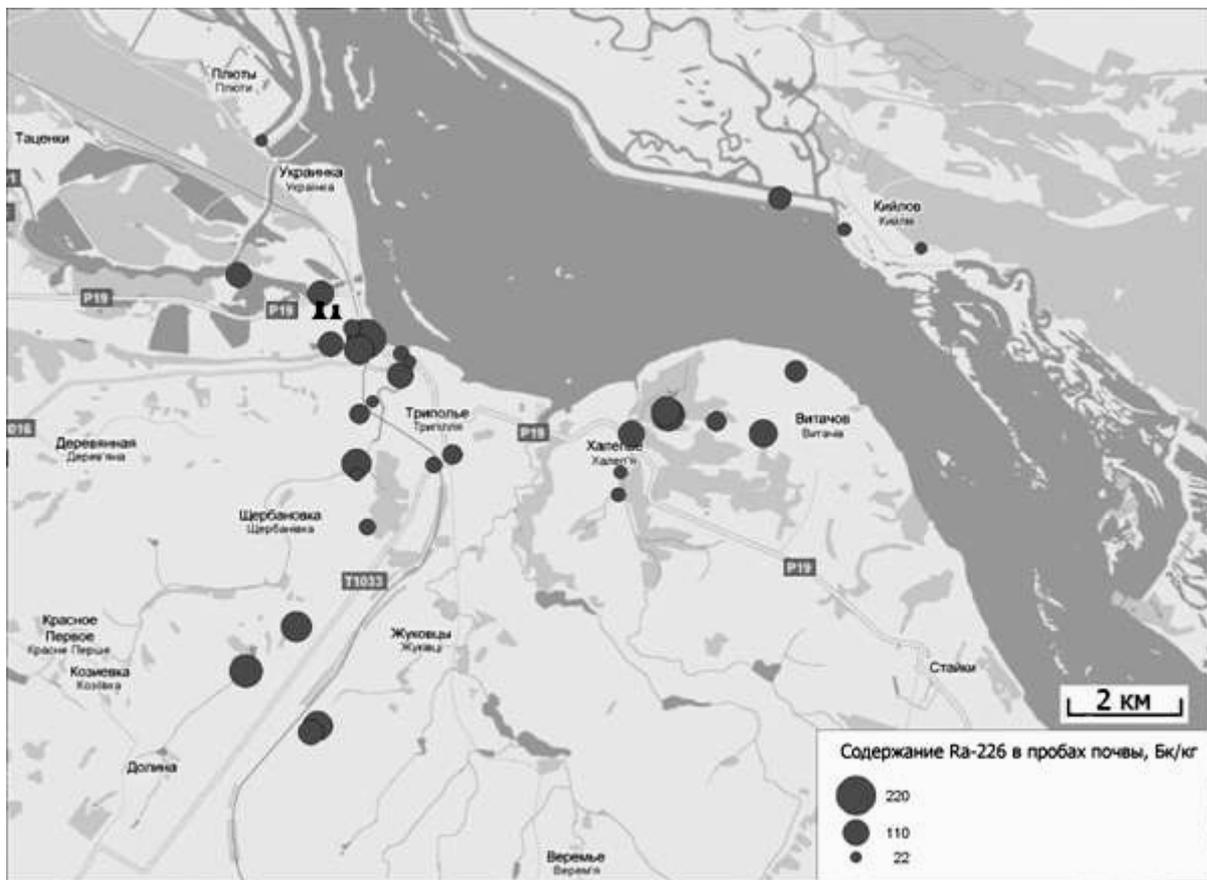


Рис. 4. Карта распределения ^{226}Ra в почвах в зоне влияния Трипольской ТЭС

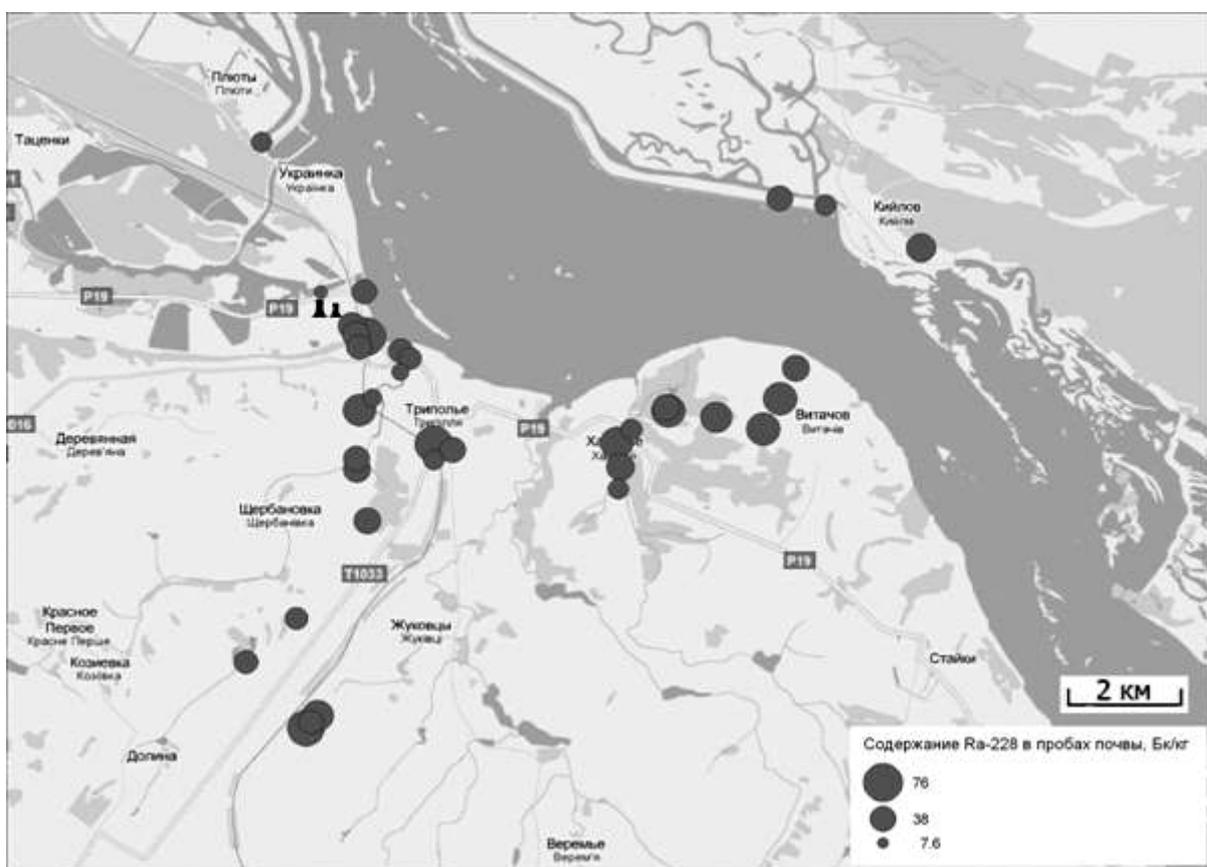


Рис. 5. Карта распределения ^{228}Ra в почвах в зоне влияния Трипольской ТЭС

Таблица 5. Интервалы концентраций радионуклидов и их средние значения в почвах из зоны влияния Трипольской ТЭС, Бк/кг

Расстояние от ТЭС	^{234}Th	^{226}Ra	^{228}Ra	^{223}Ra	^{40}K
	Дерново-подзолистые почвы				
До 1 км	<u>70,8 (2)</u> 56,6 – 85	<u>80,0 (3)</u> 29 – 97,5	<u>34,5 (1)</u>	<u>166 (1)</u>	<u>258 (4)</u> 112-449
От 1 до 2 км	<u>53,9 (1)</u>	<u>80,9 (3)</u> 26,4-121	<u>37,0 (3)</u> 29,6-48,8	<u>124 (3)</u> 100-148	<u>513 (7)</u> 378-607
От 2 до 4 км	<u>83,3 (3)</u> 38,7-160	<u>71,6 (6)</u> 26-154	<u>37,5 (4)</u> 24-54,8	<u>142 (3)</u> 94-180	<u>440 (4)</u> 159-638
От 5 до 7 км	<u>51,5 (6)</u> 29,6-72,1	<u>82,0 (4)</u> 39-157	<u>39,9 (8)</u> 25,5-58,4	<u>96 (3)</u> 70,7-135	<u>479 (4)</u> 373-537
От 9 до 11 км	<u>98,1 (5)</u> 21-267	<u>46,7 (3)</u> 26,5-82,4	<u>36,4 (2)</u> <u>26,2-46,2</u>	<u>98,4 (3)</u> 27-153	<u>181 (6)</u> 75-328
	Черноземные почвы				
До 1 км	<u>103 (1)</u>	<u>134 (2)</u> 50 - 218	<u>53,0 (3)</u> 39,3 – 75,7	<u>245 (1)</u>	<u>475 (3)</u> 199-673
От 1 до 2 км	<u>79,8 (2)</u> 46,5-113	<u>64,8 (3)</u> 27,6-104	<u>37,4 (2)</u> 19,4-55,3	<u>131 (1)</u>	<u>323 (3)</u> 155-543
От 5 до 7 км	<u>78,3 (3)</u> 41,4-102	<u>72,7 (7)</u> 32-111	<u>41,7 (4)</u> 26,1-54,9	<u>139 (2)</u> 129-149	<u>508 (4)</u> 398-682
От 7 до 9 км	<u>61,1 (6)</u> 28,7-110	<u>110 (4)</u> 80-132	<u>51,6 (6)</u> 32-70	<u>208 (4)</u> 163-296	<u>659 (6)</u> 533-789
56-57 км	<u>62,3 (2)</u> 58,2-66,3	<u>98,4 (4)</u> 54,4-119	<u>38,4(4)</u> 24,1-58,3	<u>113 (3)</u> 96-136	<u>499 (4)</u> 437-549
Зола ТЭС	41,8-55,1	220-246	54-61	130-470	818-1180

В числителе приведены средние значения активности (в скобках – число образцов), в знаменателе – пределы значений.

Интервалы концентраций ЕРН в почвах каждой из зон отбора проб весьма широки и, как правило, интервалы значений активности отдельных радионуклидов для образцов различной удаленности отбора перекрываются между собой. Средние значения концентраций ^{226}Ra и ^{228}Ra очень незначительно различаются для групп дерново-подзолистых почв различной удаленности отбора (табл. 5). Исключение составляет только средняя активность ^{226}Ra в дерново-подзолистых почвах, отобранных на расстоянии 9–11 км от ТЭС (46,7 Бк/кг). Эта величина существенно ниже средних значений концентрации ^{226}Ra в почвах, отобранных на меньшем удалении, которые составляют 72 – 82 Бк/кг.

Такое различие в значениях концентрации ^{226}Ra можно было бы приписать загрязнению близлежащих к ТЭС почв техногенной составляющей продуктов сгорания угля, а дерново-подзолистые почвы, отобранные на расстоянии 9–11 км, квалифицировать как условно чистые. Однако, как можно видеть из таблицы 5, эти почвы более обогащены изотопом ^{234}Th , чем почвы из более приближенных к ТЭС участков и не отличаются от этих почв по активности ^{228}Ra . Кроме того, тренд снижения концентрации ^{226}Ra с удаленностью от источника загрязнения не подтверждается данными таблицы 5 для черноземных почв – средняя концентрация ^{226}Ra в относительно чистых черноземах, отобранных на расстоянии 56–57 км (98,4 Бк/кг) выше, чем в черноземных почвах, отобранных на расстоянии от 1 до 2 км и от 5 до 7 км от ТЭС.

По-видимому, вариации концентраций ЕРН в почвах в районе Трипольской ТЭС, отраженные в таблице 5, являются особенностью этих почв, а не следствием техногенного привноса радионуклидов. В частности, дерново-подзолистые почвы,

отобранные на расстоянии 9–11 км, находятся на левом берегу Днепра и существенно отличаются по составу от правобережных дерново-подзолистых почв гораздо более низким содержанием целого ряда микроэлементов. Можно предположить, что в процессе почвообразования этих почв произошло более значительное нарушение радиоактивного равновесия между ^{226}Ra и ^{234}Th , чем при образовании правобережных дерново-подзолистых почв. В пользу влияния геохимических процессов на радионуклидный состав этих почв свидетельствует дефицит в них не только щелочно-земельного ^{226}Ra , но и щелочного ^{40}K .

В целом, можно сделать вывод, что почвы имеют достаточно значительный естественный радиоактивный фон и характеризуются настолько индивидуальными соотношениями ЕРН, что незначительная добавка техногенной составляющей не позволяет установить усредненный тренд распределения радионуклидов по площади. Можно рассмотреть отдельные точки, где отмечается обогащение почв изотопом ^{226}Ra в комплексе с повышенным соотношением изотопов $^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$, что, по нашему мнению, можно считать индикатором техногенного привноса в почву продуктов сгорания угля.

Это, например, дерново-подзолистая почва Т-12, отобранная в полутора километрах на юго-восток от Трипольской ТЭС. Она характеризуется наибольшей концентрацией ^{226}Ra в своей группе почв по удаленности от ТЭС (121 Бк/кг) и относительно высоким отношением $^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$, равным 2,25 (табл. 3). Кроме того, этот образец отличается наиболее высоким в группе содержанием ^{228}Ra (по ^{228}Ac) – 48,8 Бк/кг и высокой концентрацией ^{40}K . Такое комплексное обогащение почвы Т-12 изотопами радия и калия, которыми богата зола ТЭС, может свидетельствовать о накоплении в ней техногенной составляющей ЕРН.

То же можно сказать и о дерново-подзолистой почве Т-45, отобранной на расстоянии 6,4 км в юго-восточном направлении от ТЭС. Она имеет максимальные для своей группы активности ^{226}Ra (157 Бк/кг), ^{228}Ra (58,4 Бк/кг) и ^{223}Ra (135 Бк/кг), высокую концентрацию ^{40}K (517 Бк/кг) и отношение $^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$, равное 2,98 (табл. 3).

Среди черноземных почв можно предположить загрязненность техногенными ЕРН образца Т-43, отобранного на расстоянии 8,1 км на юго-восток от ТЭС. Эта черноземная почва характеризуется высоким отношением $^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$, равным 4,46, высокими концентрациями ^{226}Ra (128 Бк/кг) и ^{223}Ra (296 Бк/кг). Однако, вывод о загрязненности ЕРН черноземных почв представляется более рискованным из-за большей обогащенности почв этого типа изотопами радия и калия. Так, относительно чистые черноземы Т-57 и Т-58, отобранные на расстоянии 56-57 км от ТЭС имеют отношение $^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th} > 1,5$ и концентрации ^{226}Ra более 100 Бк/кг (см. табл. 3).

Выводы

1. При сгорании угля с дымовыми выбросами в атмосферу поступают частицы золы-уноса, содержащие ЕРН, которые выпадают на поверхность почвы в течение работы ТЭС. Зола Трипольской ТЭС обогащена изотопами ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{40}K .

2. Почвы содержат ЕРН, унаследованные от материнских горных пород, и характеризуются нарушениями радиоактивного равновесия между изотопами в рядах распада ^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U , которые являются следствием как геохимических процессов формирования и функционирования почв, так и образования газообразных продуктов распада (изотопы радона).

3. Обогащение почв изотопом ^{226}Ra в комплексе с повышенным отношением изотопов $^{226}\text{Ra}/^{234}\text{Th}$ можно считать индикатором техногенного привноса продуктов сгорания угля.

4. Добавка техногенной составляющей ЕРН от выбросов Трипольской ТЭС является недостаточно масштабной по сравнению с содержанием тех же

радионуклидов в почве, что не позволяет установить усредненный тренд распределения радионуклидов по площади.

5. В зоне влияния Трипольской ТЭС отмечены отдельные точки, где наблюдается обогащение почв изотопами радия и ^{40}K . Выявление загрязненности черноземных почв ЕРН представляет собой более сложную задачу, чем для дерново-подзолистых, из-за большей обогащенности черноземов изотопами радия и калия.

6. Загрязнение почв ЕРН от выбросов Трипольской ТЭС незначительно и не представляет экологической опасности. Однако это не ставит под сомнение опасность присутствия этих радионуклидов в атмосфере для органов дыхания человека.

1. Пивоваров Ю.П. Радиационная экология: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Ю.П. Пивоваров. – М.: Издательский центр Академия. – 2004. – 240 с.

2. Давыдов М.Г. Радиоэкология. – М.: Наука. – 2002. – 154 с.

3. Бабаев Н.С., Демин В.Ф., Ильин Л.А. и др. Ядерная энергетика, человек и окружающая среда – М.: Энергоиздат. – 1984. – 312 с.

4. Доповідь про стан середовища в Донецькій області за 1996 рік // Общественный экологический Internet-проект EcoLife. – <http://www.eclife.ru/education/ppress/donetsk96/gl14.php>

5. Пучков Л.А., Воробьев А.Е. Человек и биосфера: вхождение в техносферу. – М.: Изд-во МГГУ. – 2000. – 343 с.

6. Мельник Н.А., Корнилов П.Н. Анализ и оценка радиационной безопасности при использовании золы Апатитской ТЭС для производства строительных материалов // <http://insep.ksc.ru/htm/web-5/ippes/conf/STS-100-081006/conf/Section4/s4-mel-2.htm>.

7. Титаева Н.А. Ядерная геохимия. – М.: МГУ. – 2000. – 336 с.

8. Акимов А.М. Модель формирования природных радионуклидов в атмосфере при добыче и переработке урановых руд // Збірник наукових праць СНУЯЕ та П. Загальнонаукові і спеціальні дослідження. – Севастополь. – 2008. – Вип. 4 (28). – С.101-109.

9. Buckley R.L. Modeling atmospheric deposition using a stochastic transport model. WSRC-TR-99-00409. 1999.

Л.В. Кононенко, М.Г. Бондаренко, В.Й. Манічев, В.І. Власенко

ПРИРОДНІ РАДІОНУКЛІДИ В ҐРУНТАХ ЗОНИ ВПЛИВУ ТРИПІЛЬСЬКОЇ ТЕС.

Концентрації природних радіонуклідів визначені в ґрунтах зони впливу Трипільської ТЕС і в зразках золи ТЕС. Незначне збагачення ґрунтів ізотопами радію та ^{40}K відзначено в окремих точках зони Трипільської ТЕС.

L.V. Kononenko, M.G. Bondarenko, V.I. Manichev, V.I. Vlasenko

NATURAL RADIONUCLIDES IN THE SOILS OF THE TRYPILLYA TPP ZONE OF INFLUENCE.

Concentration of natural radionuclides are defined in the soils of the zone of influence Trypillya TPP and in the samples of ash. The slight enrichment of soil by isotopes of radium and ^{40}K was defined in the individual points in the Trypillya TPP zone.